

Функции распределения концентраций хлорофилла и взвешенного вещества в водах Обской губы и центральной части Карского моря

В.Е. Павлов¹, И.В. Хвостов¹, Н.Ю. Курепина¹,
Н.М. Ковалевская¹, Л.А. Хворова^{2*}

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

²Алтайский государственный университет
656015, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

Поступила в редакцию 10.07.2019 г.

На основе многолетних данных, полученных с европейского спутника ENVISAT, выполнен статистический анализ содержания хлорофилла и взвешенного вещества в водах Обской губы и центральной части Карского моря (от о-ва Белый на север до восточного берега северной территории арх. Новая Земля). Установлено, что эмпирические функции распределения концентраций хлорофилла и взвеси в обеих акваториях, включая прибрежную зону Обской губы, тяготеют к нормальному логарифмическому закону. Определены статистические параметры распределений, а также характеристики намечающихся широтных трендов логарифмов концентраций в Карском море. Полученные результаты представлены в виде графиков и таблиц и могут быть использованы при построении моделей распространенности дисперсных составляющих в водах исследуемой зоны Северного Ледовитого океана.

Ключевые слова: хлорофилл, взвешенное вещество, Обская губа, Карское море, спектрофотометр MERIS, нормальные логарифмические распределения; chlorophyll, suspended matter, the Gulf of Ob, the Kara Sea, MERIS spectrophotometer, lognormal distributions.

Введение

Вопрос о содержании примесей в природных водоемах относится к числу важнейших в океанологии, экологии, охране окружающей среды и т.д. Значимость этой фундаментальной проблемы хорошо сформулирована в работах А.П. Лисицына и соавторов [1–2].

Интерес к исследованиям фитопланктона, минеральных и органических примесей в океанской воде связан с глобальным изменением климата, особенно активным в северных широтах [3]. Происходящее потепление приводит к уменьшению общей массы фитопланктона на 1% в год [4]. Обширные сведения о результатах исследований фитопланктона и взвешенного вещества можно найти, например, в [5–8].

Прямой отбор проб воды в северных широтах обычно осуществляется нерегулярно и ограничивается летним периодом. Однако хлорофилл имеет полосы поглощения в видимом участке спектра, благодаря чему его содержание в воде определяется со спутника в режиме мониторинга. Установлено, что

судовые результаты измерений хлорофилла в северных морях хорошо согласуются с данными дистанционного зондирования Земли [8].

В наших исследованиях выполнен статистический анализ содержания хлорофилла и взвешенного вещества в Обской губе и центральной части Карского моря на основе многолетних спутниковых данных. Цели настоящей работы следующие:

- обобщение максимально возможного объема однородных экспериментальных данных за счет привлечения рядов спутниковых измерений с наиболее продолжительным временным охватом;
- установление вида функций распределения концентраций анализируемых веществ;
- сравнение концентраций хлорофилла C_{chl} (мг/м³) и взвешенного вещества C_{sm} (г/м³) в «морских», «речных» и «смешанных» водах Обской губы с концентрациями в центральной части Карского моря;
- получение табличных данных и гистограмм распределения концентраций, необходимых для построения моделей.

Расчеты концентраций выполнены по данным каталога Coast Colour, сформированного в результате обработки данных спутникового спектрометра MERIS [9, 10], базировавшегося на платформе ENVISAT с 2002 по 2011 г. В основу вычислений положены биооптические алгоритмы [11, 12].

* Владимир Евгеньевич Павлов (vpavlov_37@mail.ru); Илья Владимирович Хвостов (khvostov.iwep@ya.ru); Надежда Юрьевна Курепина (kurepina@iwep.ru); Нелли Михайловна Ковалевская (nelleyk@mail.ru); Любовь Анатольевна Хворова (KhvorovaLA@gmail.com).

При извлечении данных в акваториях использованы регулярные сетки с расстояниями между узлами 10–15 км. Отдельно исследованы значения в точках, расположенных вдоль береговых линий (рис. 1). Данные измерений охватывают временной период с 2003 по 2011 г. и относятся ко второй-третьей декадам июля.

Даты смен фаз водного режима (половодье, паводок, межень, переходные процессы) меняются от года к году. По этой причине из-за нерегулярной доступности спутниковых данных (облачность, аэрозоль и другие помехи) следует полагать, что анализируемые ряды не могут быть сопоставлены ни с какими конкретными фазами водного режима. Они, скорее, представляют собой смешанную выборку или «сборную пробу» [13]. К интерпретации таких данных может быть применен развитый нами ранее подход [14].

Акватория центральной части Карского моря

Исследуемый участок (рис. 1, 1) простирается от о-ва Белый на север до восточного берега арх. Новая

Земля и ориентирован вдоль траектории выноса пресных вод из эстуария Оби. На участке выбрано 238 точек. Общий объем выборки за 9 лет – 685 значений. Концентрации хлорофилла и взвеси демонстрируют статистические распределения (рис. 2, а, б), близкие к нормальному логарифмическому закону. На рис. 2 в, г представлен широтный ход логарифмов концентраций этих веществ, наблюдаемый в пределах участка 1; они имеют линейные тренды.

Количественное описание функций распределения и широтных трендов концентраций приведено в таблице. Статистическая значимость коэффициентов линейных трендов подтверждается по критерию Стьюдента ($P < 10^{-4}$).

Парные корреляции между значениями концентраций хлорофилла и взвеси незначительны ($R < 0,5$), равно как и между значениями логарифмов их концентраций ($R < 0,6$). Таким образом, если говорить о характерных значениях концентраций исследуемых примесей, то в расчетах следует применять среднегеометрические величины, которые могут существенно отличаться от среднеарифметических (таблица), что согласуется с выводами работ [15–17].

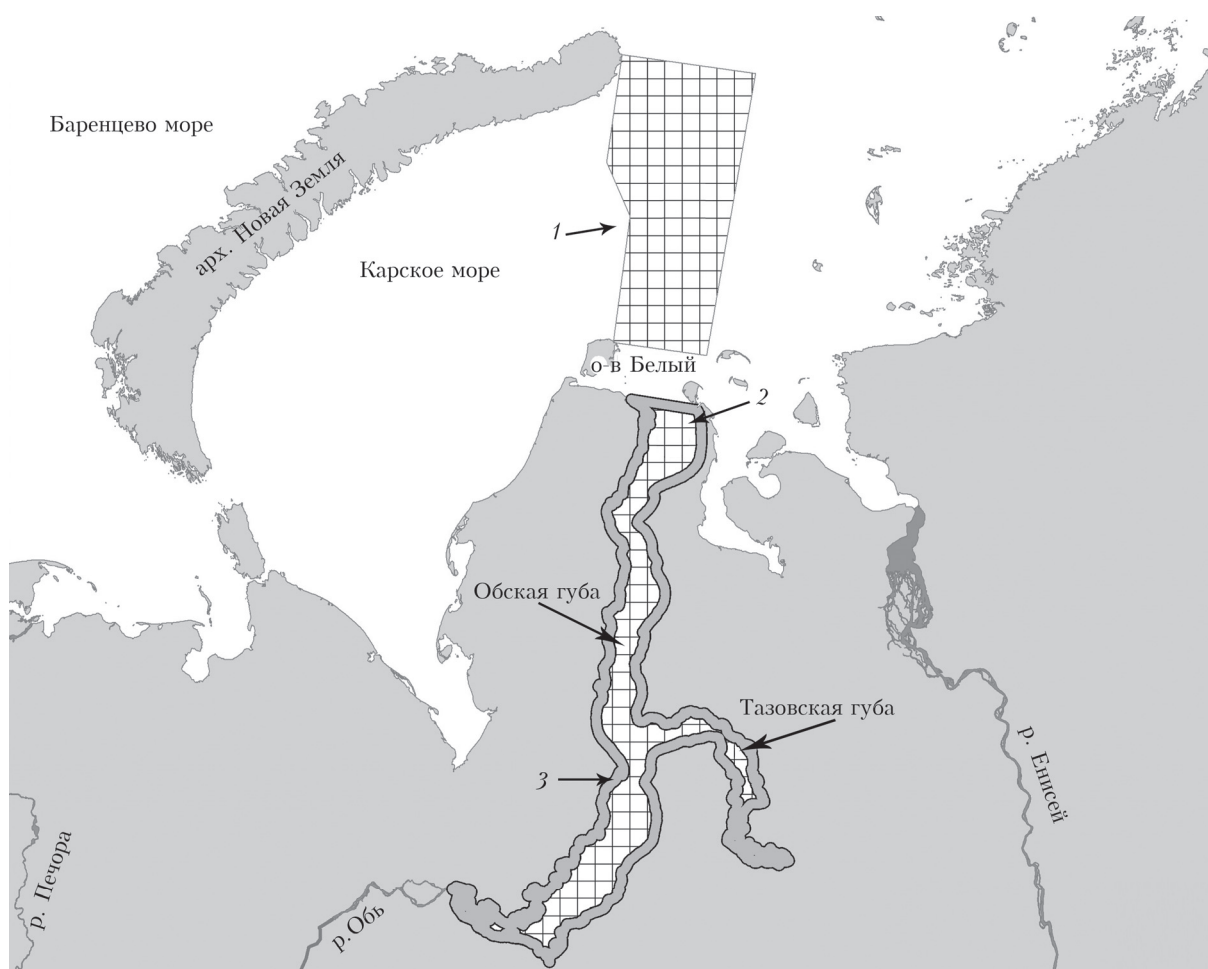


Рис. 1. Схема исследуемых участков (1–3) Карского моря и Обской губы

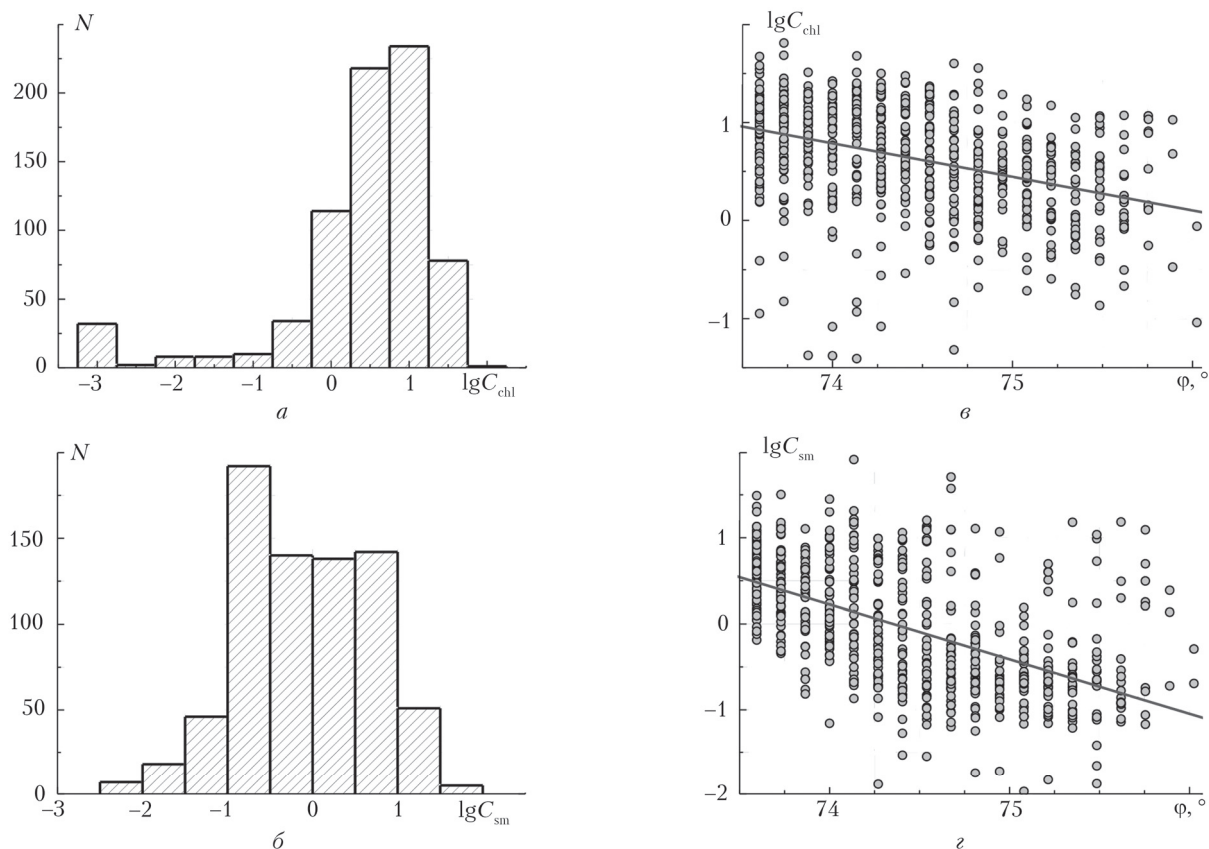


Рис. 2. Гистограммы эмпирических функций распределения логарифмов концентраций: *а* – хлорофилла; *б* – взвеси; *в, г* – их широтное распределение в Карском море

Статистические параметры распределений и широтных трендов

Выборка	Величина	Статистические параметры	Широтный тренд, ед. / град	Ср. арифм.	Ср. геом.
Акватория Карского моря [N = 685]	C_{chl}	$x = 7,73; \sigma = 7,90; A = 2,06; E = 9,9$	$-0,34 \pm 0,03$	7,73	4,37
	lgC_{chl}	$x = 0,64; \sigma = 0,54; A = -0,77; E = 3,7$			
	C_{sm}	$x = 2,88; \sigma = 5,57; A = 6,44; E = 72$	$-0,64 \pm 0,04$	2,88	0,87
	lgC_{sm}	$x = -0,06; \sigma = 0,71; A = 0,11; E = 2,2$			
Акватория Обской губы [N = 4742]	C_{chl}	$x = 22,2; \sigma = 12,1; A = 1,28; E = 4,7$	отсутствует	22,2	19,1
	lgC_{chl}	$x = 1,28; \sigma = 0,24; A = -0,55; E = 4,4$			
	C_{sm}	$x = 3,56; \sigma = 25,6; A = 1,38; E = 4,9$	отсутствует	35,6	27,5
	lgC_{sm}	$x = 1,44; \sigma = 0,32; A = -0,28; E = 2,8$			
Прибрежная зона Обской губы [N = 2818]	C_{chl}	$x = 24,5; \sigma = 13,8; A = 1,53; E = 5,7$	$-0,39 \pm 0,002$	24,5	21,4
	lgC_{chl}	$x = 1,33; \sigma = 0,24; A = -0,33; E = 4,4$			
	C_{sm}	$x = 30,5; \sigma = 23,8; A = 1,80; E = 7,3$	$-0,29 \pm 0,004$	30,5	23,4
	lgC_{sm}	$x = 1,37; \sigma = 0,33; A = -0,12; E = 2,8$			

Примечание: N – объем выборки; x – среднее по выборке значение; σ – среднеквадратическое отклонение; A – коэффициент асимметрии; E – коэффициент эксцесса.

Акватория Обской губы

Исследованы акватории Обской и отчасти Тазовской губ до выхода в Карское море вблизи о-ва Белый, от $66,35^\circ$ до $72,78^\circ$ с.ш. (рис. 1, 2). Выбрано 260 точек, которые удалены от береговой линии на расстояние не менее 3 км. Общий объем выборки за 9 лет — 4742 значения. Графическое представление результатов имеет примерно тот же вид, что и на рис. 2. Эмпирические функции распределения концентраций хлорофилла и взвеси близки к нормальному логарифмическому закону. Анализ широтного хода величин $\lg C_{chl}$ и $\lg C_{sm}$ показывает, что они начинают убывать при $\varphi \geq 70,6^\circ$ с.ш., что в целом согласуется с данными [8]. Большой разброс данных измерений не позволяет четко определить границы между «речными» и «морскими» водами. Для такой фиксации нужно использовать аналогичный объем данных, но полученных одновременно, а не за 9 лет. Разновременность данных, скорее всего, и «смазывает» границу, которая, в силу естественных причин, не может оставаться на одном месте.

Акватория прибрежной зоны

Были проанализированы данные, относящиеся к прибрежным участкам акваторий Тазовской и Обской губ до выхода в Карское море вблизи о-ва Белый, от $66,35^\circ$ до $72,78^\circ$ с.ш. (рис. 1, 3). Выбрано 193 точки, удаленные от береговых линий не более чем на 300 м. Межгодовая изменчивость русла, сезонные подъемы и спады уровня воды не позволяют без привлечения дополнительных данных точно установить, насколько была удалена точка измерения от берега в тот или иной год. Общий объем выборки за 9 лет — 2818 значений. Как и в предыдущем случае, эмпирические функции распределения концентраций C_{chl} и C_{sm} оказались близкими к нормальному логарифмическому закону.

Из данных таблицы следует, что характерные значения концентраций определяемых веществ в открытой части акватории Обской губы в пределах статистического разброса совпадают с соответствующими значениями для прибрежной зоны. На широтах $67,5-70,0^\circ$ с.ш. в прибрежной зоне наблюдаются повышенные значения концентраций хлорофилла. Аналогичные повышенные значения наблюдаются и в открытой части акватории Обской губы, но ниже по течению — на широтах $69,0-71,0^\circ$ с.ш. В соленых водах Карского моря концентрации определяемых веществ (хлорофилла и взвеси) ниже, чем в эстуарии Оби, и они убывают по мере увеличения солености вод и понижения температуры в более высоких широтах.

Территориально обобщенные результаты

На рис. 3 приведены гистограммы распределения логарифмов концентраций хлорофилла и взвеси

по всем 691 точкам за все годы наблюдений. Они рассчитаны для единой выборки по всем участкам общим объемом 8245 значения. Данные могут оказаться полезными при построении крупномасштабной модели примесей в центральной части моря.

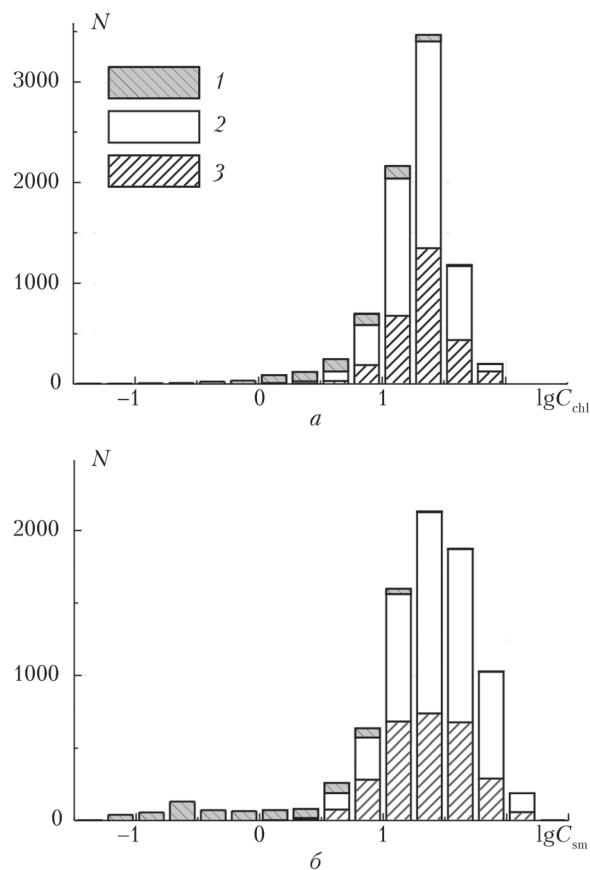


Рис. 3. Вклад каждого участка (1–3) в обобщенные гистограммы распределения логарифмов концентраций: а — хлорофилла; б — взвешенного вещества

Гистограммы асимметричны: имеют более развитое левое крыло, простирающееся в область малых значений логарифмов концентраций. Асимметрия обусловлена присутствием в общей выборке значений, относящихся к различным участкам акваторий. Гистограммы для каждого года в отдельности имеют аналогичный вид. Гистограммы логарифмов концентраций, построенные отдельно для каждого участка 1–3, практически симметричны. О вкладе каждого участка в обобщенную гистограмму можно судить по данным рис. 3. Видно, что левое крыло обобщенных гистограмм возникает из-за пониженного содержания хлорофилла и минеральной взвеси в Карском море (участок 1).

Заключение

Выполнен статистический анализ концентраций хлорофилла и взвешенного вещества в Обской губе и в центральной части Карского моря на основе многочисленных спутниковых данных, полученных оптическими методами. Для не слишком крупных акваторий можно констатировать, что функции

распределения концентраций по числу случаев измерений близки к нормальному логарифмическому закону. Это позволяет рекомендовать при построении различных региональных моделей взвесей использовать среднегеометрические величины.

1. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М.: Наука. 1974. 488 с.
2. Лисицын А.П., Клювиткин А.А., Буренков В.И., Кравчишина М.Д., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Шевченко В.П., Клювиткина Т.С. Определение и состав взвешенного осадочного вещества на меридиональных разрезах в Атлантическом океане: прямые определения и спутниковые данные // Докл. АН. 2016. Т. 466, № 2. С. 221–224.
3. Кабанов М.В. Региональные климаторегулирующие факторы в Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 107–113.
4. Levis M.R., Worm B. Global phytoplankton decline over the past century // Nature. 2010. V. 466. P. 591–596.
5. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
6. Суханова И.Н., Флинт М.В., Дружкова Е.И., Сажин А.Ф., Сергеева В.И. Фитопланктон северо-западной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55, № 4. С. 605–619.
7. Агапова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. Пространственно-временная изменчивость органического вещества и скоростей его трансформации в Обской губе // Океанология. 2013. Т. 53, № 2. С. 175–191.
8. Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д. Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2007 года по судовым и спутниковым данным // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 842–849.
9. MERIS Product Handbook. Issue 3.0. European Space Agency. 1 August 2011 [Electronic resource]. URL: <https://envisat.esa.int/handbooks/meris/toc.html> (last access: 10.06.2019)
10. O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell G., Siegel D.A., Carder K., Garver D.L., Kahru M., McClain C.R. Ocean color chlorophyll algorithm for SeaWiFS // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 24937–24953.
11. Moore T.S., Campbell J.W., Feng H. A fuzzy logic classification scheme for selecting and blending satellite ocean color algorithms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. V. 39, N 8. P. 1764–1776.
12. Schiller H., Doerffer R. Neural network for emulation of an inverse model – operational derivation of case II water properties from MERIS data // Int. J. Remote Sens. 1999. V. 20, N 9. P. 1735–1746.
13. Храмова Е.П., Павлов В.Е., Тарасов О.В., Крылова Е.И., Хвостов И.В. Содержание флавоноидов *Rosentilla Ffruticosa* (Rosaceae) в градиенте радионуклидного загрязнения // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 1. С. 37–48.
14. Голобокова Л.П., Павлов В.Е., Хвостов И.В., Ходжер Т.В. Распределение ряда ионов и малых газовых составляющих по концентрациям в приземном воздухе некоторых районов Восточной Сибири и Дальнего Востока // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 359–365.
15. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении // Докл. АН СССР. 1941. Т. 31, № 2. С. 99–101.
16. Долгоносов Б.М., Корчагин К.А. Моделирование изменчивости показателей солевого состава речной воды // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 3. С. 345–358.
17. Маньковский В.И., Гринченко Д.В. Структура взвеси в водах Средиземного моря // Морской геофиз. журн. 2014. № 3. С. 3–11.

V.E. Pavlov, I.V. Khvostov, N.Y. Kurepina, N.M. Kovalevskaya, L.A. Khvorova. The distribution functions of chlorophyll and suspended matter concentrations in the waters of the Gulf of Ob and the central part of the Kara Sea.

On the basis of long-term data obtained from the European ENVISAT satellite, the statistical analysis of chlorophyll and suspended matter concentrations in the Gulf of Ob and its extension to the Kara Sea from Bely Island to Novaya Zemlya was performed. It was found that empirical functions of chlorophyll and suspended matter concentration distribution in both water areas, including the coastal zone of the Gulf of Ob, tend to the lognormal law. Statistical parameters of distributions and characteristics of the latitudinal trends of logarithms of concentrations in the Kara Sea are determined. The obtained results are presented in graphical and tabular forms and can be used in modelling the distribution of dispersed components in the waters of the Arctic Ocean under study.